

Tren Unsur-Unsur Surih dan Nadir Bumi Batuan Kompleks Benta, Pahang sebagai Petunjuk kepada Proses Pembentukan dan Evolusi Batuan

MOHD ROZI UMOR & SYED SHEIKH ALMASHOOR

Program Geologi, Fakulti Sains dan Teknologi
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 Bangi, Selangor, Malaysia

Abstrak

Sebanyak 3 jenis batuan, iaitu diorit kuarza, sienit porfir dan monzonit dari Kompleks Benta, Pahang telah dianalisis dengan menggunakan teknik Pendaflour Sinar-X (XRF) dan Analisis Pengaktifan Neutron Instrumentasi (INAA) bagi mendapatkan nilai kepekatan 21 unsur surih dan 9 unsur nadir bumi. Unsur-unsur surih dan nadir bumi ini dikelompokkan kepada 6 kumpulan iaitu, kumpulan unsur LILE (large ion lithophile elements), unsur HFSE (high field strength trace elements), unsur logam peralihan (trace transition metal), unsur logam (trace metal), unsur tidak stabil dan unsur nadir bumi (rare earth elements). Daripada pengiraan indeks pembezaan, didapati arah pembezaan batuan adalah dari diorit kuarza kepada sienit porfir dan kemudian monzonit. Kesemua unsur-unsur ini telah diplotkan melawan indeks pembezaan, kecuali unsur nadir bumi. Tren plotan graf unsur-unsur ini menunjukkan keselarisan dengan teori perubahan unsur di dalam pembezaan batuan yang dicadangkan oleh penyelidik lain. Daripada tren perubahan unsur-unsur surih ini juga diketahui proses peleburan separa yang berlaku terhadap diorit kuarza yang mana leburannya membentuk sienit dan sienit pula mengalami peleburan separa dan leburannya dicemari oleh diorit dan membentuk monzonit. Disokong dengan cerapan lapangan dan petrogarfi batuan, maka sejarah pembentukan batuan di Kompleks Benta boleh disintesis. Selain daripada itu, punca asalan batuan juga diketahui berdasarkan tren unsur-unsur nadir bumi. Ia merupakan jasad granit jenis I.

Trends of Trace Elements and Rare Earth Elements in the Benta Complex as an Indicator of Rock Genesis and Evolution Processes

Abstract

Three types of rocks within the Benta Complex of Pahang, namely the quartz diorite, porphyry syenite and monzonite were analyzed using X-ray fluorescence (XRF) and Instrumentation of Neutron Activated Analyses (INAA) to obtain the concentration of 21 trace elements and 9 rare earth elements (REE). The trace and rare earth elements can be divided into 6 groups, which are large ion Liphophile elements, high field strength trace elements, earth elements, trace transition metal and trace metals, unstable elements and rare earth elements. Based on the differential index, the rock differentiation trend is from quartz diorite to porphyry syenite and monzonite. All the elements apart from the rare earth elements have been plotted against the differential index. The plotted trends are in agreement with the results of other workers on elemental changes during differentiation. Based on the changing trends in trace elements, it is interpreted that partial melting of quartz diorite has formed the syenite. The syenite then underwent partial melting to form monzonite, and subsequent contamination resulted in diorite. This trend is supported by field observations and petrography, thus enabling a synthesis of rock genesis in the Benta Complex. The rocks originated from I-type granites.

PENGENALAN

Batuan Kompleks Benta, Pahang diwakili oleh batuan yang terdapat di Jeram Besu dan bekas kuari JKR, Benta seperti yang dikaji sebelum ini oleh Hutchison (1971) dan Syed Sheikh Almashoor (1994). Jeram Besu berada 32.2 km dari Kuala Lipis dan 6.4 km dari Benta, sementara bekas kuari JKR terletak lebih kurang 1 km dari Jeram Besu menghala ke Benta.

Terdapat lima jenis batuan di kawasan ini iaitu, diorit biotit hornblend kuarza (diorit kuarza), sienit ortoklas hornblend biotit (sienit porfir), monzonit ortoklas hornblend

biotit (monzonit porfir), telerang mikrogranit dan satu batuan metamorf dinamakan psamit kuarza hornblend biotit (psamit). Namun begitu, tumpuan diberikan kepada tiga jenis batuan sahaja iaitu, diorit kuarza, sienit porfir dan monzonit porfir. Ini kerana ia adalah batuan yang dominan di kawasan ini dan boleh dikelompokkan di dalam satu kumpulan batuan yang sama berdasarkan kandungan kimia.

Analisis unsur-unsur surih dan nadir bumi dilakukan bagi mengetahui asalan batuan, proses-proses yang berlaku di dalam pembentukan batuan dan jujukan evolusi batuan.

KAEDAH ANALISIS

Persampelan

Sebanyak 47 sampel dari Jeram Besu dan 41 sampel dari bekas kuari JKR telah diambil untuk analisis makmal. Kesemua sampel ini telah dibuat keratan nipis batuan bagi mendapatkan gambaran tahap luluhawa batuan. Daripada jumlah ini, cuma 20 sampel sahaja dipilih untuk dianalisis. Ia melibatkan 3 sampel diorit kuarza dari Jeram Besu, 3 sampel sienit porfir dari bekas kuari JKR, 3 sampel monzonit dari Jeram Besu, 4 sampel psamit dan 7 sampel telerang.

Analisis Pendaflour Sinar-X (XRF)

Analisis pendaflour Sinar-X dilakukan di Program Geologi, UKM menggunakan mesin jenis Phillip PW 1480. Kuasa radiasi yang digunakan bagi penjaan unsur-unsur surih ialah 80kW x 30mA bersamaan 2400W, berbeza dengan unsur major yang menggunakan 40kW x 60mA. Bagi penjaan ini, tiub rodium digunakan kerana ia sesuai dengan kesemua nombor atom. Pengesanan bagi unsur-unsur surih dilakukan dengan menggunakan pembilang "sintillation".

Terdapat 20 unsur surih yang boleh dikesan, iaitu Nb, Zr, Y, Sr, Rb, Pb, As, Ga, Cu, Zn, Hf, Co, Ba, Th, U, Ni, Cr, V, Sc dan La. Sampel disediakan dalam bentuk pelet tekan. Teknik penyediaan sampel adalah mengikut teknik yang diterangkan oleh Noorish dan Hutton (1969).

Analisis Pengaktifan Neutron Instrumentasi (INAA)

Analisis pengaktifan neutron instrumentasi dilakukan untuk mendapatkan nilai unsur-unsur surih dan nadir bumi yang mempunyai nilai kepekatan yang rendah, iaitu di dalam unit bahagian per juta (ppm). Terdapat 33 unsur yang boleh ditentukan dengan kaedah ini. Selain 20 unsur-unsur surih yang diperolehi dari analisis XRF, terdapat 4 unsur surih tambahan yang diperolehi, iaitu Br, Sb, Cs dan Ta, dan 9 unsur-unsur nadir bumi iaitu La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Yb dan Lu. Analisis ini juga boleh mengukur kepekatan unsur-unsur major dalam nilai tunggal seperti Ti, Mg, Na, Al, Mn, Ca dan Fe.

Analisis ini dijalankan di Pusat Penyelidikan Tenaga Nuklear Malaysia (MINT) dan melibatkan 14 sampel, iaitu 2 sampel psamit, 3 sampel sienit, 2 sampel diorit kuarza, 4 sampel monzonit porfir, 2 sampel telerang pegmatit dan 1 sampel telerang aplit. Sampel disediakan dalam bentuk serbuk. Ia ditimbang dan dimasukkan ke dalam tiub sampel yang kemudiannya disinarkan untuk pengaktifan neutron. Kemudahan reaktor yang terdapat di pusat ini ialah jenis Reaktor Triggar MK II.

KEJITUAN DAN KEPERSISAN ANALISIS

Dalam analisis makmal, kepersisan dan kejitian analisis sering menjadi persoalan bagi memastikan nilai bacaan yang diperolehi meyakinkan atau sebaliknya. Ia melibatkan

ralat-ralat yang mungkin terjadi semasa penyediaan sampel meliputi kaedah penimbangan, pelarutan, pencemaran semasa menghancurkan sampel dan memanaskan sampel.

Kebersihan dan Kejitian Analisis XRF

Bagi kaedah XRF, nilai kepersisan alat diperolehi dengan menganalisis kesemua sampel batuan sebanyak lima kali. Batuan yang dianalisis sebanyak lima kali ini disediakan dari sampel yang sama tetapi proses pembuatan pelet yang diulang-ulang. Nilai purata setiap unsur dianggap nilai sebenar. Peratus ralat yang didapati di antara 0.07-6.43 % dan nilai ralat ini masih boleh diterima.

Bagi mendapatkan kejitian analisis, 20 sampel piawaian antarabangsa digunakan bagi membentuk graf piawaian setiap unsur. Graf piawaian ini akan menjadi bandingan untuk mendapatkan nilai kepekatan setiap unsur di dalam sampel. Graf yang mempunyai nilai peratusan ralat kejitian yang lebih kecil adalah lebih bermakna. Didapati bagi unsur yang berkepekatan tinggi ralat kejitian yang diperolehi lebih besar berbanding dengan ralat kejitian bagi unsur berkepekatan rendah.

Kebersihan dan Kejitian Analisis INAA

Analisis pengaktifan neutron mempunyai tahap kejitian yang tinggi bergantung kepada penyinaran yang dilakukan. Had pengesanan bagi kebanyakan unsur adalah di antara 10^{-7} hingga 10^{-8} g/g. Ia sangat bergantung kepada separuh hayat radioaktif yang terhasil semasa pengaktifan. Ini kerana pengukuran dibuat berdasarkan kepada parameter ini. Dua jenis bahan rujukan piawai telah digunakan, iaitu SDC-1 dan QLO daripada Agensi Tenaga Atom Antarabangsa (IAEA). Kedua-dua bahan piawaian ini telah dibandingkan dengan piawai primer yang disediakan dari larutan tulin unsur-unsur berkenaan (Jadual 1). Piawai-piawai ini digunakan bagi memastikan kejitian setiap kali analisis dijalankan. Sebelum menjalankan analisis terhadap sampel, piawai SDC-1 dan QLO dianalisis terlebih dahulu sebagai bandingan.

Jadual 1: Nilai piawaian rujukan dibandingkan dengan nilai yang diperolehi semasa menjalankan analisa INAA bagi memastikan kejitian analisis. Nota: ¹Nilai piawai SDC-1 dan QLO yang telah dipiawaikan berdasarkan kajian Govindaraju *et al.* (1984) dan Hoede *et al.* (1981). ²Nilai piawaian SDC-1 dan QLO yang telah digunakan sebagai perbandingan bagi menentukan kejitian analisis terhadap sampel.

Unsur	Nilai piawaian dari rujukan		Nilai diperolehi dari analisa	
	¹ SDC-1	¹ QLO	² SDC-1	² QLO
La	40.9±1.2	27.1±1.0	40.576	29.197
Ce	91±7	52±1	103.987	51.745
Nd	53±8	25±7	32.97	32.031
Sm	7.26±0.66	4.59±0.10	7.867	4.956
Eu	1.73±0.03	1.33±0.05	1.673	1.344
Tb	1.2±0.1	0.61±0.07	1.911	0.599
Dy				
Yb	4.2±0.3	2.2±0.1	5.038	2.326
Lu	0.66±0.12	0.36±0.05	0.591	0.432

HASIL ANALISIS

Analisis unsur-unsur surih dan nadir bumi bagi diorit, sienit dan monzonit ditunjukkan pada Jadual 2 boleh dikelompokkan kepada enam kumpulan, iaitu unsur-unsur LILE (large ion lithophile elements), unsur-unsur HFSE (high field strength trace elements), unsur-unsur logam peralihan (trace transition metals), unsur-unsur logam (trace metal), unsur-unsur tidak stabil dan unsur-unsur Lantanida atau nadir bumi.

Unsur-unsur LILE

Unsur-unsur LILE terdiri daripada Rb, Ba, Cs dan Sr. Graf diplotkan antara indeks pembezaan terhadap unsur-unsur ini (Rajah 1). Unsur Rb dan Ba boleh menggantikan K yang terkandung di dalam feldspar alkali sahaja. Sedangkan Sr pula boleh menggantikan Ca yang terdapat di dalam plagioklas dan juga K di dalam feldspar alkali (El Bouseily dan El Sokkary, 1975).

Unsur-unsur Rb dan Sr menunjukkan penambahan kepekatan ke arah penambahan indeks pembezaan (Ahrens *et al.*, 1952; Taylor *et al.*, 1956). Keadaan ini jelas ditunjukkan oleh tren graf unsur Rb daripada diorit (128-150 ppm) ke sienit (237-303 ppm), tetapi berkurangan sedikit di dalam monzonit (238-277 ppm) (Rajah 1(a)). Begitu juga dengan Sr didapati diorit (640-700ppm), sienit (854-904 ppm) dan monzonit (872-939 ppm) (Rajah 1(b)).

Sementara bagi Cs pula, nilainya di dalam diorit (7.48-10.6 ppm), sienit (4.2-13.0 ppm) dan monzonit (14.4-31.8 ppm). Daripada nilai-nilai kepekatan Rb, Sr, Cs dan Ba, diperhatikan nilai kepekatan Sr dan Ba adalah lebih tinggi berbanding Rb dan Cs.

Bagi Rb, peningkatannya selaras dengan peningkatan pembezaan batuan (Ahrens *et al.*, 1952; Taylor *et al.*, 1956) dan selaras dengan pertambahan feldspar alkali di dalam batuan. Bagi unsur Sr, keadaan ini selaras dengan kenyataan bahawa di dalam batuan bes dan pertengahan, kepekatan Sr bertambah dengan penurunan kepekatan Ca

Jadual 2: Unsur-unsur surih dan nadir bumi bagi diorit, sienit porfir dan monzonit yang diperolehi daripada analisa XRF dan INAA. Nota: K-nilai diperolehi melalui pengiraan, *-unsur-unsur LILE, **-unsur-unsur HFSE, ***-unsur-unsur nadir bumi, #-unsur-unsur besi peralihan, ##-unsur-unsur logam.

	Diorit kuarza dari Jeram Besu			Sienit porfir dari bekas kuarl			Monzonit dari Jeram Besu		
Unsur	J29	J27	J25	K1	K3	K5	J11	J7	J9
Rb*	129.63	128.96	150.59	237.4	275.6	303.58	277.89	238.22	232.03
Cs	8.631	9.675	7.48	13.042		14.297		31.887	14.434
Sr	702.92	644.29	686.56	904.97	854.49	887.6	872.84	939.33	958.3
Ba	3053.85	2826.84	2965.39	4228.06	3729.56	3949.17	3435.79	3848.13	4333.03
Zr**	339.14	317.16	325.25	558.16	497.18	509	446.72	428.17	438.5
Hf	3.22	2.72	2.68	10.33	9.6	7.77	9.65	9.65	10.23
Nb	29.31	21.59	22.15	36.96	38.46	33.56	22.15	23.49	22.59
Ta	1.65	1.372	1.623	2.644		3.039		1.583	1.931
Y	22.25	23.78	26.78	47.28	47.89	48.91	43.55	42.89	38.33
La***		89.575	80.919	138.518	155.59	154.649	139.62	133.816	115.417
Ce		241.113	240.457	435.005		524.038		362.391	294.08
Nd		63.467	73.317	58.654		82.289		55.244	69.351
Sm		11.794	13.176	21.348		24.968		14.183	15.286
Eu		2.858	3.132	4.248		4.9		3.158	3.411
Tb		1.375	1.214	1.469		1.829		1.043	1.205
Dy		7.325	6.736	8.191		10.227		6.324	7.054
Yb		4.305	3.8405	2.991		2.931		2.966	2.534
Lu		0.518	0.373	0.381		0.66		0.381	0.268
Sc#	22.63	20.23	21.56	17.29	15.35	16.35	13.77	10.13	10.51
V	120.19	126.13	124.62	118.29	111.91	116.64	115.75	101.67	98.01
Cr	28.56	34.39	33.25	15.43	14.63	15.15	13.03	11.8	10.97
Ni	64.77	54.94	53.68	35.37	35.37	39.71	28.13	28.13	28.87
Co	35.73	33.3	31.6	23.43	27.53	26.95	15.89	15.13	16.45
Cu##	20.47	21.29	21.05	25.7	26.8	27.1	15.96	26.34	22.79
Zn	58.88	60.01	58.95	69.33	64.33	69.75	72.44	71.44	68.05
Ga	15.47	17.35	18.25	11.75	12.81	11.25	20.9	27.09	28.26
As	8	7.5	7.7	11.11	12.74	9.28	10.38	11.02	13.32
Pb	84.53	83.81	84.65	87.18	84.62	83.48	90.3	90.72	92.9
Th	3.43	2.38	3.56	26.89	30.56	34.56	12.24	13.98	16.49
U	4.09	4.39	5.65	6.85	7.89	5.89	3.25	3.32	3.45
K	32712.77	29408.45	35455.35	50226.09	50391.3	53365.22	37751.28	34632.72	36930.65

(Butler dan Skiba, 1962) tetapi di dalam batuan asid kepekatan Sr berkurangan dengan pengurangan Ca (Sen *et al.*, 1959; Hall, 1967).

Unsur Ba pula dikatakan meningkat daripada diorit kepada diorit kuarza dan granodiorit (El Bouseily dan El Sokkary, 1975) dan berkurangan di dalam jujukan akhir arah pembezaan (Nockolds dan Allen, 1953). Penurunan Ba yang ketara adalah di dalam batuan lampau asid (Kolbe dan Taylor, 1966). Kenyataan ini selaras dengan tren graf yang diperolehi yang mana nilai kepekatan di dalam diorit (2800-3000 ppm) bertambah kepada sienit (3700-4200 ppm) dan berkurang sedikit di dalam monzonit (3600-3860 ppm) (Rajah 1(c)).

Berdasarkan tren graf nisbah Sr/Rb terhadap indeks pembezaan, didapati kenaikan kepekatan Sr adalah lebih cepat berbanding Rb, terutamanya peningkatan dari sienit kepada monzonit (Rajah 1(e)). Nisbah Sr/Rb ini sepatutnya berkurangan dengan pertambahan pembezaan (Ahrens *et al.*, 1952; Taylor *et al.*, 1956). Daripada Rajah 1(e), didapati nisbah Sr/Rb berkurangan dari diorit ke sienit tetapi bertambah dari sienit ke monzonit. Penulis berpendapat pertambahan ini menunjukkan berlakunya pencemaran oleh diorit terhadap monzonit yang menaikkan kepekatan Sr.

Tren graf nisbah Sr/Ba terhadap indeks pembezaan pula menunjukkan dari diorit ke sienit, kenaikan kepekatan Ba dan Sr adalah hampir sama. Tetapi dari sienit ke monzonit peningkatan Sr adalah lebih cepat berbanding Ba (Rajah 1(f)). Ini menunjukkan berlaku pengurangan Ba dari sienit kepada monzonit. Tren graf nisbah Rb/Ba terhadap indeks pembezaan pula menunjukkan bahawa kenaikan Ba lebih besar berbanding kenaikan Rb (Rajah 1(g)). Daripada kedua-dua tren graf nisbah Sr/Ba dan Rb/Ba ini, ia menunjukkan bahawa pengurangan Ba telah menaikkan kepekatan Sr sahaja, sedangkan Rb tidak berubah. Ini selaras dengan kenyataan bahawa pengurangan Ba menyebabkan kenaikan salah satu unsur Sr atau Rb sahaja (Bouseily dan El Sokkary, 1975).

Di dalam siri pembezaan, nisbah Sr/Ba bertambah dengan pertambahan pengfraksian (Heir dan Taylor, 1959). Namun begitu, pertambahan ini adalah ketara dari sienit kepada monzonit, sedangkan dari diorit kepada sienit nisbahnya tidak berubah (Rajah 1(f)). Ini menunjukkan bahawa dari diorit ke sienit, pembezaan batuan tidak begitu ketara berbanding pembezaan sienit kepada monzonit. Penulis percaya perbezaan yang tidak ketara adalah disebabkan proses peleburan separa diorit yang kemudian mengablur membentuk sienit, sedangkan dari sienit kepada monzonit berlaku juga peleburan separa tetapi proses pembezaan batuan dan pengfraksian mineral memainkan peranan yang lebih penting. Di samping proses-proses ini berlaku juga pencemaran oleh diorit terhadap monzonit. Peleburan separa menyebabkan plagioklas yang kaya Ca melebur dan kepekatan Sr dikekalkan.

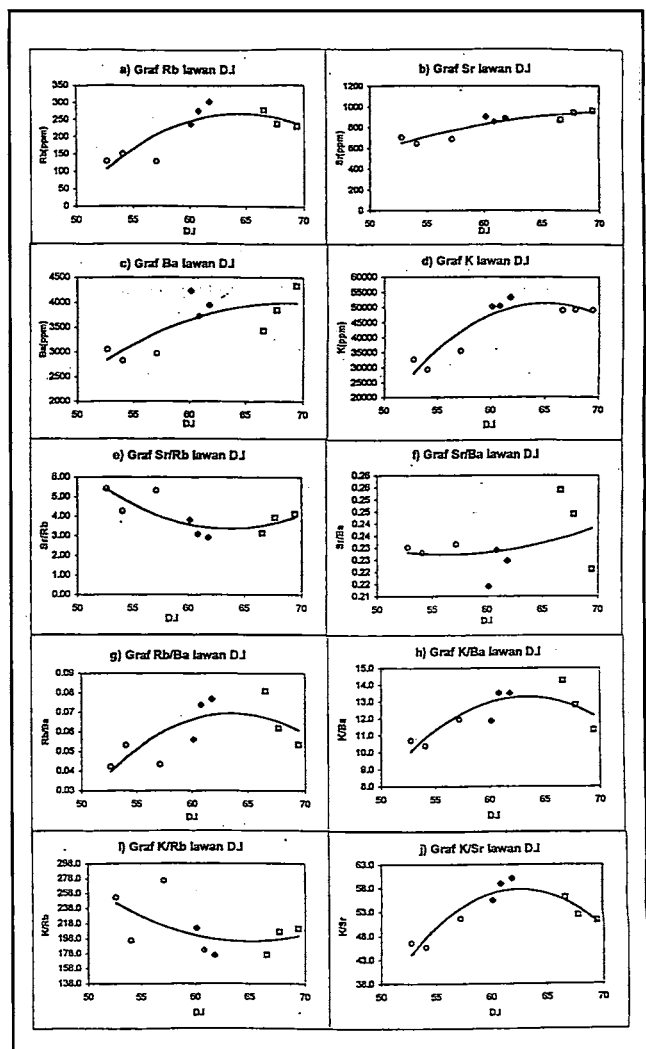
Tren graf nisbah K/Ba adalah bertambah dengan pertambahan indeks pembezaan (Bouseily dan El Sokkary, 1975). Ini selaras bahawa Ba berkurang dengan pertambahan pembezaan (Rajah 1(h)). Tren graf nisbah K/Rb pula,

berkurang dengan pertambahan indeks pembezaan (Rajah 1(i)). Ini menunjukkan Rb bertambah dengan pertambahan pembezaan dari diorit kepada sienit. Ia selaras dengan kenyataan bahawa Rb tidak berubah di dalam diorit kepada diorit kuarza dan granodiorit (Bouseily dan El Sokkary, 1975), tetapi bertambah dengan pertambahan feldspar alkali di dalam sienit (Heir dan Taylor, 1959).

Tren nisbah K/Sr menunjukkan kenaikan dari diorit ke sienit tetapi berkurangan sedikit dari sienit ke monzonit. Kenaikan nisbah ini menunjukkan K bertambah dari diorit ke sienit. Pertambahan ini menunjukkan Sr kurang berperanan menggantikan K di dalam feldspar alkali berbanding dengan Rb. Tetapi dari sienit ke monzonit, nisbah K/Sr berkurangan. Ini disebabkan kepekatan K di dalam feldspar alkali bagi monzonit semakin berkurangan. Penulis percaya pengurangan K ini adalah disebabkan oleh pencemaran monzonit oleh diorit.

Unsur-Unsur Logam Peralihan

Unsur-unsur logam peralihan seperti Ni, Cr, Co, Sc dan V, terdapat di dalam batuan dengan nilai kepekatan



Rajah 1: Tren unsur-unsur LILE terhadap indeks pembezaan. Petunjuk: □ - diorit; ○ - sienit; ◆ - monzonit.

antara 10 ppm hingga 120 ppm. Graf indeks pembezaan terhadap unsur-unsur logam ini menunjukkan hubungan yang negatif, iaitu semakin bertambah pembezaan, maka semakin berkurangan unsur-unsur ini (Rajah 2). Ini selaras dengan kenyataan bahawa unsur logam boleh mencapai 820 ppm di dalam batuan mafik dan kurang daripada 10 ppm di dalam batuan felsik (Gleason *et al.*, 1994).

Di dalam diorit, kepekatan unsur-unsur ini adalah tinggi, iaitu Ni (53-64 ppm), Cr (28-34 ppm), Co (33-35 ppm), Sc (20-22 ppm) dan V (120-126 ppm). Kepekatan unsur-unsur ini semakin berkurangan di dalam sienit dan monzonit, iaitu mengikut jujukan bagi sienit dan monzonit ialah Ni (35-39 ppm, 28.13-28.87 ppm), Cr (14-15 ppm, 10.97-13.03 ppm), Co (23-27 ppm, 15.13-16.45 ppm), Sc (15-17 ppm, 10.13-13.77 ppm) dan V (15-17 ppm, 10.13-10.51 ppm).

Cr dan Ni yang tinggi boleh dijangkakan berpunca dari magma asal, iaitu akibat kehadiran piroksen. Nisbah Ni/Co pula dikatakan menurun semasa pengfraksian batuan daripada batuan bes kepada batuan asid (Taylor, 1966). Tetapi bagi batuan ini dengan pertambahan indeks pembezaan, nisbah Ni/Co didapati tidak begitu berubah (Rajah 2(e)). Sedikit kenaikan nisbah Ni/Co dari sienit ke monzonit menunjukkan berlaku pencemaran monzonit oleh diorit. Sementara nisbah Cr/Mg dikatakan berkurangan dengan pertambahan pembezaan (Nockolds dan Allen, 1953). Ini ditunjukkan oleh Rajah 2(f).

Unsur-unsur HFSE

Unsur-unsur ini terdiri daripada Ta, Nd, Zr dan Hf. Unsur Zr yang terdapat di dalam zirkon boleh menggantikan Mg dan Fe yang terdapat di dalam mineral silikat seperti biotit (Goldsmith, 1926). Terdapat hubungan yang linear diantara Zr dan SiO_2 (Tarney dan Saunders, 1979). Oleh itu, Zr boleh digunakan sebagai paksi x menggantikan SiO_2 di dalam gambarajah Harker (Zhao *et al.*, 1995; Tarney dan Saunders, 1979). Namun begitu, saya berpendapat penggunaan Zr sebagai paksi x adalah tidak sesuai di dalam kajian ini. Pendapat ini dibuat berdasarkan kenyataan bahawa siri batuan alkali menunjukkan kepekatan Zr yang maksimum di tahap pertengahan pembezaan, berbeza dengan siri kalk-alkali yang menunjukkan hubungan yang linear terhadap jujukan pembezaan (Nockolds dan Allen, 1953). Ini dibuktikan oleh Rajah 3(a) yang menunjukkan kepekatan Zr yang maksimum di dalam sienit.

Kesemua unsur-unsur ini menunjukkan pertambahan kepekatan dari diorit kepada sienit, tetapi berkurangan sedikit di dalam monzonit (Rajah 3). Ini selaras dengan kajian oleh Fourcade dan Claude (1981) berkaitan batuan pluton alkali dan Gleason *et al.* (1994) yang berkaitan dengan pluton Barrel Spring.

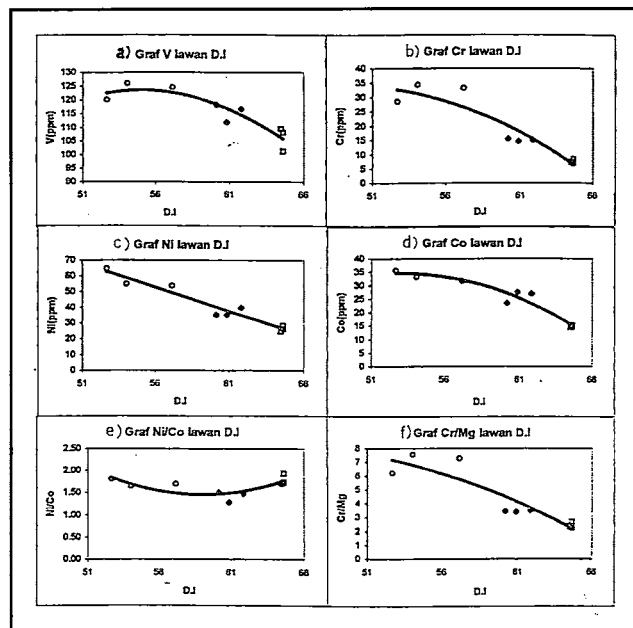
Unsur Zr yang membentuk zirkon menjadi petunjuk kepada tahap akhir penghabluran sesuatu batuan (Zhao *et al.*, 1995). Berbeza dengan unsur TiO_2 dan P_2O_5 yang menjadi petunjuk kepada penghabluran awal batuan. Kepekatan Zr yang tinggi dan nisbah $(\text{Na}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ yang tinggi di dalam sienit menunjukkan suhu

penghablurannya lebih tinggi (Watson dan Harrison, 1985).

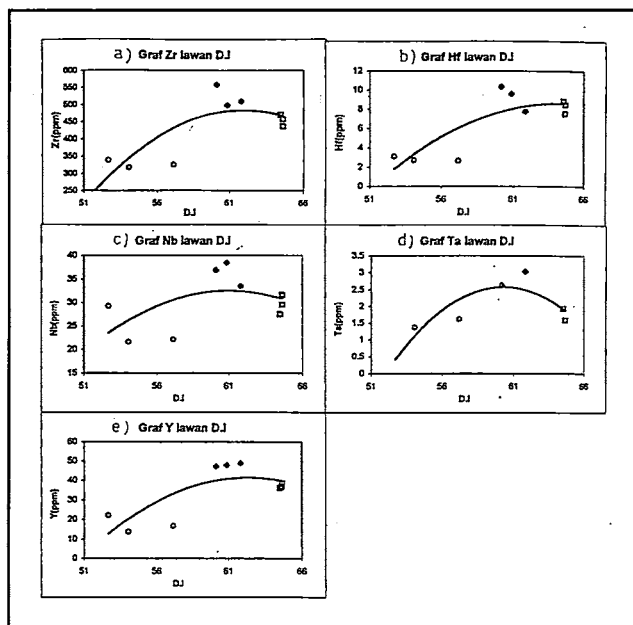
Ta bertambah dari diorit (1.3-1.6 ppm) kepada sienit (2.6-3.0 ppm) dan berkurangan di dalam monzonit (1.5-1.9 ppm). Begitu juga dengan Hf, iaitu diorit (2.6-3.2 ppm), sienit (7.7-10.3 ppm) dan monzonit (9.6-10.0 ppm). Ta dan Nb terdapat di dalam sfen (Gleason *et al.*, 1994). Ia selaras dengan cerapan mikroskop yang menunjukkan sfen banyak ditemui di dalam sienit.

Unsur-unsur Tidak Stabil

Unsur-unsur tidak stabil terdiri daripada Th dan U. Unsur Th dan U bertambah dengan pertambahan indeks



Rajah 2: Tren unsur-unsur logam peralihan terhadap indeks pembezaan. Petunjuk: □ - diorit; ○ - sienit; ◆ - monzonit.



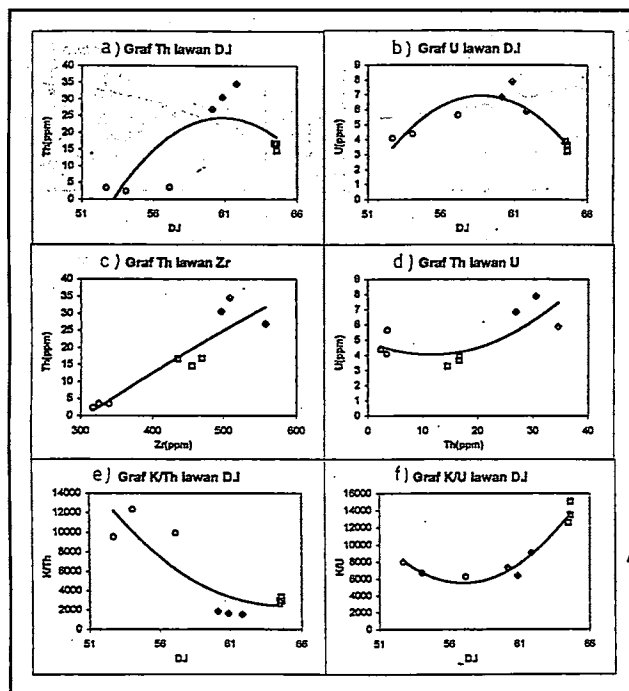
Rajah 3: Tren unsur-unsur HFSE terhadap indeks pembezaan. Petunjuk: □ - diorit; ○ - sienit; ◆ - monzonit.

pembezaan (Zhao *et al.*, 1995). Tetapi di dalam siri batuan alkali ini, didapati Th dan U bertambah dari diorit (2.3-3.56 ppm, 4.0-5.6 ppm), kepada sienit (26-34 ppm, 5.8-7.8 ppm) dan berkurang di dalam monzonit (14-16.5 ppm, 3.2-3.9 ppm) (Rajah 4(a) dan (b)). Unsur Th terdapat di dalam zirkon. Oleh itu, didapati tren graf Th terhadap Zr menunjukkan hubungan positif (Rajah 4(c)). Nisbah Th/U pula di antara 6-13. Kenaikkan Th lebih cepat berbanding U dari diorit ke sienit (Rajah 4(d)).

Th dan U boleh menjadi petunjuk kepada suhu penghabluran batuan. Nisbah K/Th dan K/U adalah antara 2000-15000 (Rajah 4(e) dan (f)). Nilai ini adalah cukup tinggi berbanding nisbah K/U pukal kerak, iaitu 8300 (Wedepohl, 1991) dan hampir sama dengan nisbah unsur bumi, iaitu 13000 (McDonough *et al.*, 1992). Ini menunjukkan bahawa batuan siri alkali ini berasal dari bahan mantel dan bukannya dari kerak benua. Ia menyokong penjenisan granit sebagai jenis I. Unsur Th dan U dikatakan bertambah dengan pertambahan peleburan separa (Gleason *et al.*, 1994). Ini berdasarkan kajian Pluton Rastenberg. Oleh itu, saya percaya pertambahan unsur Th dan U dari diorit kepada sienit adalah hasil proses peleburan separa yang berlaku kepada diorit.

Unsur-unsur Logam

Unsur-unsur logam terdiri daripada Sc, Cu, Ga, As, Zn dan Pb. Ia diplotkan graf melawan indeks pembezaan. Kesemua unsur-unsur ini menunjukkan kenaikan apabila indeks pembezaan bertambah, cuma unsur Ga dan Sc sahaja yang menunjukkan penurunan (Rajah 5 (a), (b), (c), (d), (e) dan (f)).



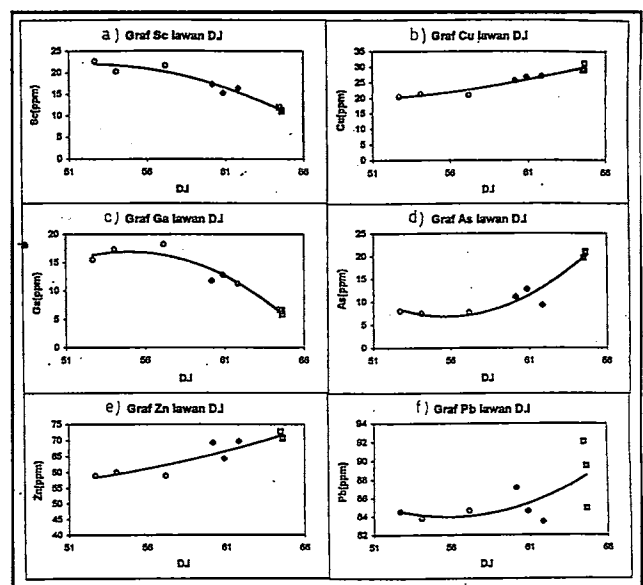
Rajah 4: Tren unsur-unsur tidak stabil terhadap indeks pembezaan. Petunjuk: □ - diorit; ○ - sienit; ◆ - monzonit.

Unsur-unsur Nadir Bumi

Unsur-unsur nadir bumi terdiri daripada LREE (Light Rare Earth Elements, iaitu La, Ce dan Nd), MREE (Medium Rare Earth Elements, iaitu Sm, Eu dan Th) dan HREE (Heavy Rare Earth Elements, iaitu Dy, Yb dan Lu). Nilai kepekatan unsur-unsur nadir bumi yang diperolehi perlu dinormalkan dengan nilai purata kondrit. Nilai-nilai yang dinormalkan ini digunakan untuk membuat plotan graf (Jadual 3).

Secara umumnya, hasil analisis menunjukkan siri batuan alkali ini mempunyai kandungan LREE yang tinggi berbanding HREE dengan nisbah La_N/Yb_N antara 13-66. Unsur LREE adalah tinggi sehingga La boleh mencapai 450 kali nilai kondrit, sementara Ce antara 260-570 kali nilai kondrit. Kandungan HREE adalah sederhana rendah dengan Yb_N antara 7-18 kali nilai kondrit. Nisbah LREE/MREE (La_N/Sm_N) adalah antara 3.9-4.8. Sementara nisbah MREE/HREE (Sm_N/Lu_N) adalah antara 4.8-19.5. Ini menunjukkan kecerunan dari LREE, MREE ke HREE hampir seragam.

Perbandingan antara ketiga-tiga batuan (diorit, sienit dan monzonit) menunjukkan LREE sienit paling tinggi, diikuti oleh monzonit dan diorit. Sementara HREE pula menunjukkan diorit paling tinggi, diikuti oleh monzonit dan sienit. Kandungan LREE yang rendah dan HREE yang tinggi di dalam diorit menunjukkan bahawa diorit telah berlaku peleburan separa. Leburan ini kemudian membentuk sienit yang mengandungi LREE yang tinggi dan HREE yang rendah. Ini berdasarkan kenyataan bahawa apabila berlaku peleburan separa, LREE akan melebur terlebih dahulu menyebabkan leburan kaya dengan LREE dan baki pepejal yang tinggal adalah kaya dengan HREE (McCarthy dan Kable, 1977). Ini adalah benar apabila melihat HREE diorit lebih tinggi berbanding sienit.



Rajah 5: Tren unsur-unsur logam terhadap indeks pembezaan. Petunjuk: □ - diorit; ○ - sienit; ◆ - monzonit.

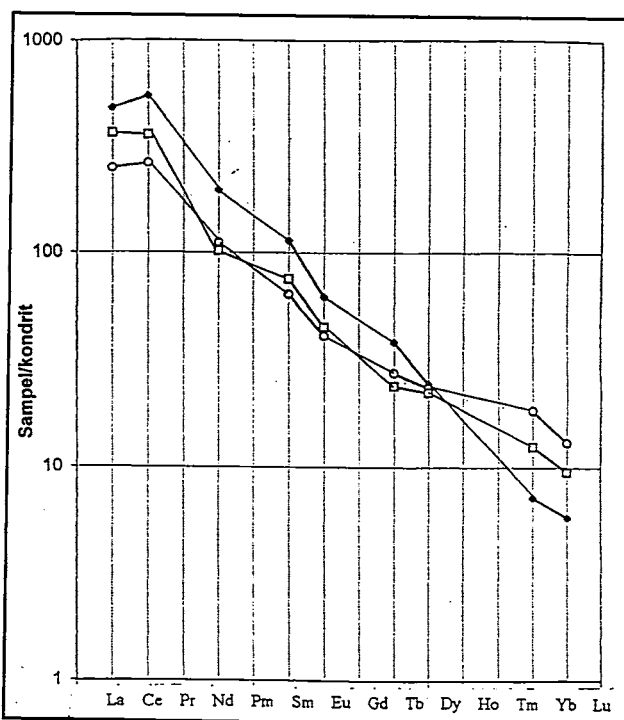
Jadual 3: Nilai unsur-unsur nadir bumi yang dinormalkan dengan kondrit dan digunakan bagi memplot graf. Nota: dhp-di bawah had pengesanan, #kondrit- nilai purata Cl kondrite oleh Wakita *et al.* (1971), Min(A)-nilai purata unsur REE psamit, Min(B)-nilai purata unsur REE sienit, Min(C)-nilai purata unsur REE diorit, Min(D)-nilai purata unsur REE monzonit, Min(E)-nilai purata unsur REE telarang.

	Nilai unsur nadir bumi sebelum dinormalkan					#Kondrite	Nilai setelah dinormalkan dengan kondrite				
	Min(A)	Min(B)	Min(C)	Min(D)	Min(E)		Min(A)	Min(B)	Min(C)	Min(D)	Min(E)
La	9.94	163.538	85.247	124.6165	10.245	0.34	29.235	480.994	250.726	366.519	30.132
Ce	46.591	498.617	240.785	328.2355	40.855	0.91	51.199	547.931	264.599	360.698	44.896
Nd	41.243	126.147	71.392	65.2975	dhp	0.64	64.442	197.105	111.550	102.027	
Sm	7.543	22.221	12.485	14.7345	4.324	0.195	38.682	113.954	64.026	75.562	22.174
Eu	1.2315	4.558	2.995	3.2845	0.423	0.073	16.870	62.438	41.027	44.993	5.795
Tb	1.2675	1.806	1.2945	1.124	0.41	0.047	26.968	38.426	27.543	23.915	8.723
Dy	8.3565	7.378	7.0305	6.688	dhp	0.3	27.855	24.593	23.435	22.293	
Yb	8.0165	1.585	4.07275	2.75	1.6095	0.22	36.439	7.205	18.513	12.500	7.316
Lu	1.017	0.198	0.4455	0.3245	0.737	0.034	29.912	5.824	13.103	9.544	21.676
La _N /Yb _N							0.802	66.763	13.544	29.322	4.119
La _N /Sm _N							0.766	4.221	3.916	4.851	1.359
Sm _N /Lu _N							1.293	19.568	4.886	7.917	1.023

Daripada sienit kepada monzonit, saya percaya berlaku juga peleburan separa sienit. Namun begitu, proses pembezaan, pengfraksian mineral dan pencemaran oleh diorit memainkan peranan yang lebih penting sehingga menyebabkan petunjuk bagi menjelaskan proses peleburan separa agak sukar diperolehi. Penurunan LREE dari sienit ke monzonit dan nisbah LREE/HREE yang besar pada sienit menunjukkan berlaku pembezaan dan pengfraksian mineral. Kenaikan HREE dari sienit ke monzonit adalah disebabkan berlakunya pencemaran oleh diorit (Rajah 6).

Tren graf REE boleh menunjukkan asalan dan evolusi batuan. Penambahan dan pengurangan jujukan unsur-unsur REE adalah berkait rapat dengan proses penghabluran mineral-mineral di dalam batuan (Haskin dan Paster, 1979; Gleason *et al.*, 1994; Kay dan Gast, 1973). Umumnya penghabluran berperingkat mineral menyebabkan kandungan REE berkurangan (Haskin dan Paster, 1979). Mineral-mineral tertentu menaikkan unsur-unsur REE yang tertentu contohnya garnet, ortopiroksen, klinopiroksen dan olivin banyak mengandungi unsur HREE seperti Yb dan Lu. Plagioklas pula kaya dengan Eu. Sementara mineral aksesori seperti sfen, apatit adalah kaya dengan MREE seperti Nd, Sm dan Eu dan alanit kaya dengan LREE seperti La dan Ce (Henderson, 1982; Schnitzer dan Philpotts, 1970).

Tren graf yang ditunjukkan oleh diorit, sienit dan monzonit adalah berbentuk kecerunan menurun secara seragam. Corak ini hampir sama dengan corak sienit Pluton Barrel Spring (Gleason *et al.*, 1994). Ia menunjukkan tiada nilai anomali Eu. Dari La ke Ce, terdapat sedikit kenaikan di dalam sienit tetapi di dalam diorit dan monzonit, kedua-dua unsur hampir sama banyak. La dan Ce yang seragam menunjukkan tiada penghabluran ortopiroksen, klinopiroksen, olivin atau garnet di dalam batuan (Henderson, 1982). Pengurangan yang mendadak dari Ce ke Nd pula, menunjukkan berlaku penghabluran biotit dan hornblend yang banyak di dalam kesemua batuan. Dari Nd ke Sm, sienit menunjukkan pertambahan nilai sedangkan monzonit dan diorit menurun sedikit. Pertambahan nilai



Rajah 6: Tren unsur-unsur nadir bumi bagi diorit, sienit porfir dan monzonit. Petunjuk: □ - monzonit; ○ - diorit; ◆ - sienit porfir.

Nd ke Sm di dalam sienit disebabkan kehadiran sfen dan apatit yang banyak di dalam batuan. Dari Sm ke Eu, Tb dan Dy menunjukkan penurunan secara seragam. Ketiadaan nilai anomali Eu menunjukkan bahawa plagioklas mengalami pembezaan secara berterusan dan tidak berlaku kerja semula mineral tersebut. Ini mencirikan granit adalah asalan jenis I (Henderson, 1982; Paster *et al.*, 1974; Cullers dan Arnold, 1981). Dari Dy ke Lu, semua batuan menunjukkan penurunan secara seragam tetapi kandungan HREE di dalam diorit lebih tinggi berbanding sienit dan monzonit.

KESIMPULAN

Analisis unsur-unsur surih terutamanya unsur-unsur nadir bumi belum dilakukan terhadap batuan Kompleks Benta, Pahang oleh pengkaji terdahulu. Oleh itu, kajian yang dijalankan oleh penulis memberi maklumat tambahan terhadap kawasan kajian. Daripada kajian, penulis yakin maklumat unsur-unsur surih amat bermakna bagi mendapatkan pentafsiran berkenaan asalan batuan, proses-proses pembentukan batuan dan sejarah geologi kawasan kajian.

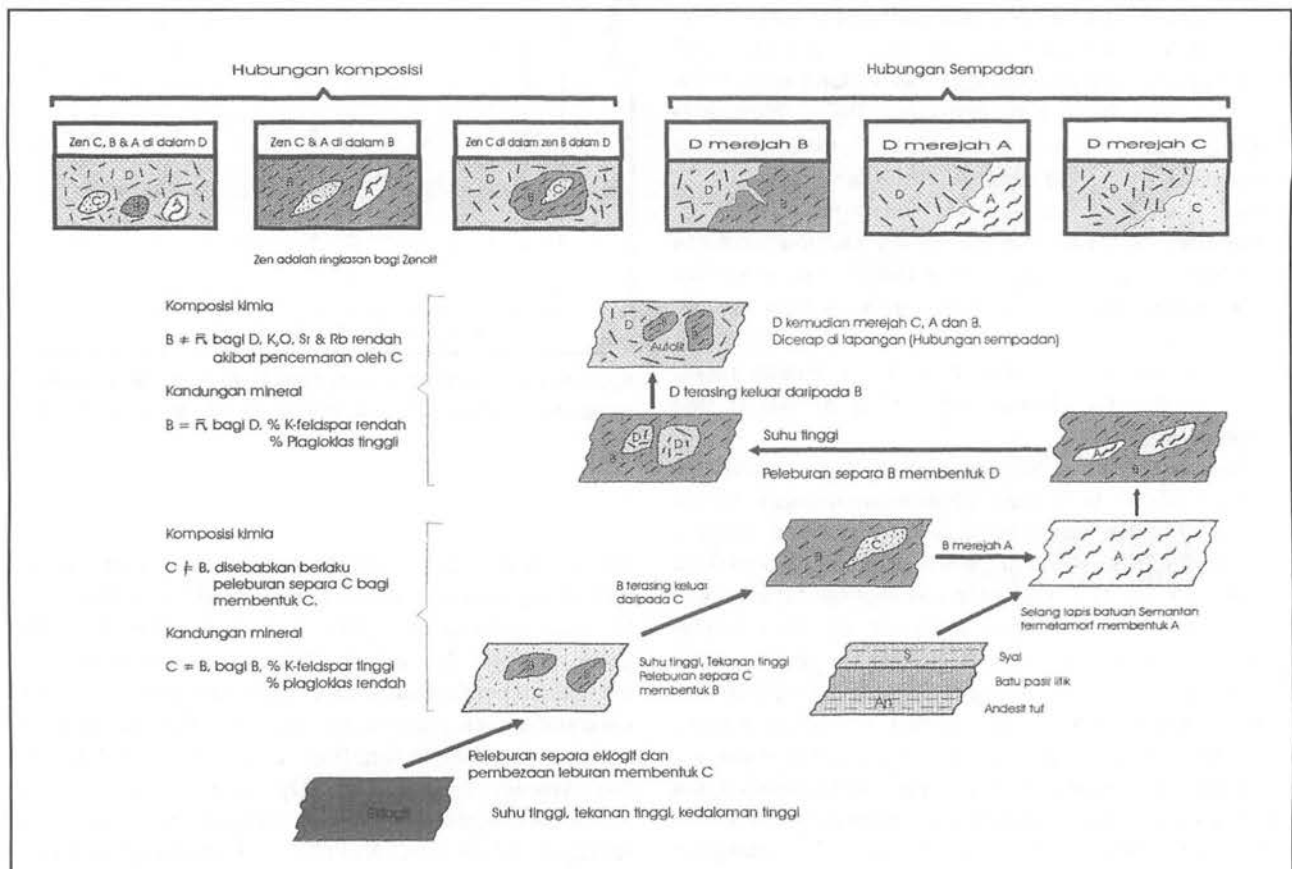
Kesimpulan yang dibuat berdasarkan tren graf unsur-unsur surih ialah arah pembezaan batuan adalah daripada diorit kepada sienit porfir dan kemudian monzonit. Sejarah jujukan pembentukan batuan di Jeram Besu dan bekas kuari, JKR, Benta boleh disintesiskan daripada kesimpulan terhadap tren unsur-unsur surih (Rajah 7). Namun begitu, kesimpulan ini mengambil kira kesimpulan daripada cerapan lapangan, kajian petrografi dan penentuan usia batuan.

Diorit dipercayai terbentuk oleh pembezaan batuan sebelumnya dan magma asal dipercayai bersifat bes. Ia relatif mempunyai kandungan SiO_2 yang rendah dan sederhana tinggi Ni, Cr, MgO berpunca dari magma yang mafik (Rapp, 1990; Rapp *et al.*, 1991). Batuan alkali ini tidak boleh terbit daripada magma yang felsik. Ini kerana, sekiranya magma induk adalah felsik (contohnya tonalit), maka nilai anomali Eu positif yang tinggi akan diperolehi dalam corak unsur nadir bumi (Rapp 1990; Gleason *et al.*

1994). Berdasarkan tren unsur nadir bumi, penulis menyimpulkan bahawa magma induk batuan alkali berpunca daripada peleburan separa eklogit. Ini selaras dengan kenyataan bahawa batuan alkali yang tidak mempunyai anomali Eu tetapi nisbah LREE/HREE yang tinggi memerlukan punca batuan jenis eklogit atau eklogit kuarza (Buma *et al.*, 1971; Ewing, 1979; Cullers dan Arnold, 1981).

Diorit didapati telah mengalami peleburan separa akibat suhu dan tekanan yang tinggi. Leburan yang terhasil ini mengablur semula membentuk sienit porfir. Ini berdasarkan bandingan unsur LREE dan HREE di dalam diorit dan sienit porfir. Semasa sienit porfir mengablur, proses pengabluran berperingkat memainkan peranan utama. Ini berdasarkan nisbah LREE/HREE yang besar. Ini menyebabkan berlakunya pengkelompokan feldspar alkali dan pengkayaan unsur K_2O semasa pembentukan sienit porfir.

Sienit porfir juga kemudiannya mengalami peleburan separa. Leburan ini mengablur membentuk monzonit. Semasa pembentukan monzonit, berlaku pencemaran oleh diorit. Pencemaran ini berlaku akibat terobosan monzonit terhadap diorit yang banyak dicera di bekas kuari JKR, Benta. Kesan daripada proses pencemaran ini menyebabkan kepekatan unsur K_2O di dalam monzonit berkurang dan Al_2O_3 bertambah. Kesan pencemaran ini ditunjukkan oleh tren unsur-unsur surih seperti nisbah Ni/Co yang sepatutnya berkurangan dengan pertambahan indeks pembezaan, tetapi



Rajah 7: Sejarah pembentukan dan evolusi batuan yang dicadangkan di Jeram Besu dan bekas kuari JKR, Benta.

dari sienit ke monzonit ia menunjukkan peningkatan. Begitu juga perubahan terhadap nisbah K/Sr, Sr/Ba dan Sr/Rb.

PENGHARGAAN

Penulis ingin mengucapkan ribuan terima kasih kepada Program Geologi, Universiti Kebangsaan Malaysia atas peruntukan analisis radiometri. Terima kasih juga kepada Dr. Syed Sheikh Almashoor selaku penyelia dan penulis bersama, juga kepada Dr. Hamzah Mohamad atas kerjasama yang diberikan. Tidak dilupakan kepada Jabatan Perhutanan Benta, Pahang atas penginapan dan pengangkutan.

RUJUKAN

- Ahrens, L.H., Pinson, W.H dan Keams, M. M., 1952. Association of rubidium and potassium and their abundance in common igneous rocks and meteorites. *Geochem. Acta* 2:229-294.
- Buma, G., Frey, F.A. dan Wones D.R., 1971. New England Granites : Trace elements evidence regarding their origin and differentiation. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 31:300-320.
- Butler, J.R. dan Skiba, W., 1962. Strontium in plagioclase feldspars from four layers basic masses in Somalia. *Mineral Magazine*, 33:213-225.
- Cullers, R.L. dan Arnold, B., 1981. The petrogenesis of the Tertiary Spanish Peaks Igneous Complex, Colorado, U.S.A. Dalam: Henderson (ed) *Rare Earth Elements Geochemistry*. Amsterdam. Elsevier.
- El Bouselly, A.M. dan El Sokkary, A.A., 1975. Relation between Rb, Ba and Sr in granitic rocks. *Chem. Geol.*, 16:207-219
- Ewing, T.E., 1979. Two calc-alkaline volcanic trends in the Archean. Trace elements evidence. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 71:1-7
- Fourcade, S. dan Claude, J.A., 1981. Trace elements behaviour in granite genesis.- A case study the calc-alkaline plutonic association from the Querigut complex, France. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 76:177-195
- Gleason, J.D., Miller, C.F., Wooden, J.L. dan Bennet, V.C., 1994. Petrogenesis of the highly potassic 1.42 Ga Barrel Spring pluton, south eastern California, with implication for mid Proterozoic magma genesis in south western USA. *Contribut. Mineral. Petrol.*, 118:182-197
- Goldsmith, V.M., 1926. The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks, *J. Chem. Soc.*, 1:655-672
- Hall, A., 1967. The distribution of some major and trace elements in feldspars from the Rosses and Ardean granite complexes, Donegal, Ireland. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 31:835-847
- Haskin, L.A. dan Paster, T.P., 1979. Geochemistry and mineralogy of the rare earths. Dalam Gschneidner, K.A. dan Eyring L. (ed) *Handbook on the physics and chemistry of rare earth*. Amsterdam. North-Holland.
- Heir, K.S. dan Taylor, S.R., 1959. Distribution of Li, Na, K, Cs, Pb and Ti in southern Norwegian Precambrian alkali feldspars, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 15:284-304
- Henderson, P., 1982. *Inorganic geochemistry*. Oxford. Pergamon Press.
- Kay, R.W. dan Gast, P.W., 1973. The rare earth elements content and origin of alkali-rich basalt. *J. Geol.*, 81:653-682
- Kolbe, P. dan Taylor, S.R., 1966. Major and trace elements relationship in granodiorites and granites from Australia and Africa. *Contribut. Mineral. Petrol.*, 12:202-222.
- McCarthy, T.S. dan Kable, E.J.D., 1977. The behaviour of rare earth elements during partial melting of the granitic rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 40:1351-1358.
- McDonough, W.F., Sun, S.S., Ringwood, A.E., Jagouts, E. dan Hofmann, A.W., 1992. Potassium, rubidium, cesium in the moon and the evolution of the mantle of the earth. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56:1001-1012
- Nockolds, S.R. dan Allen, R., 1953. The geochemistry of some igneous rock series. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 4:105-142
- Norrish, K. dan Hutton, J.T., 1969. An accurate X-ray spectrographic method for the analysis of wide range of geological samples. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 33:431-453
- Paster, T.P., Schauwecker, D.S. dan Haskin, L.A., 1974. The behaviour of some trace elements during solidification of the skaergaard layered series. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 38:1549
- Rapp, R. P., Watson, E. B. dan Miller, C. F., 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites. *Precambrian Res.*, 51: 1-25
- Rapp, R. P., 1990. *Vapor-absent partial melting of amphibolite eclogite at 8-32 kb: implications for the origin and growth of the continental crust*. PhD dissertation. RPI. Troy, NY.
- Schnetzer, C.C. dan Philpotts, J.A., 1970. Partition coefficients of some rare earth elements between igneous matrix material and rock forming mineral phenocrysts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 34:331-334
- Sen, N., Nockolds, S.R. dan Allen, R., 1959. Trace elements in mineral from rocks of California batholith. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 16:58-78
- Syed Sheikh Almashoor., 1994. The Benta Migmatite Complex revisited. *Persidangan Tahunan Geologi 1994 (Abstrak)*. Geol. Soc. Malaysia.
- Tarney, J. dan Saunders, A.D., 1979. Trace element constrains on the origin of Cordilleran Batholiths. Dalam Atherton, M.P dan Tamey, J. (eds) *Origin of granite batholiths: Geochemical evidence*. Narstich. Prentice Hall Inc.
- Taylor, S.R., 1966. The application of trace elements data to the problems of petrology. *Physic Chem. Earth*, 6:133-213
- Taylor, S.R., Emelus, C.H. dan Exley, C.S., 1956. Some anomalous K/Rb ratio in igneous rock and their petrological significance. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 10:224-229
- Wedepohl, K.H., 1991. Chemical composition and fractionation of the continental crust. *Geo. Rundsch.*, 80:207-223
- Zhao, J.X., Shirashi, K., Ellis, D.J. dan Sheraton, J.W., 1995. Geochemical and isotopic studies of syenites from the Yamato Mountains, East Antarctica: Implication for the origin of syenitic magmas. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59:1363-1382.